

РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ТОКОВЕТЕ С НУЛЕВА ПОСЛЕДОВАТЕЛНОСТ ПО ДЪЛЖИНАТА НА КАБЕЛНА ЛИНИЯ ПРИ ЕДНОФАЗНО ЗЕМНО СЪЕДИНЕНИЕ

Стефан Стефанов, Иван Проданов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. Измерването на токовете с нулева последователност на отделни участъци и тяхното сравнение е един от ефективните методи за определяне на участъка от кабелна линия, в който е станало земно съединение. В доклада се разглеждат аналитични уравнения, чрез които количествено могат да се определят токовете с нулева последователност. Предлагат се препоръки за практическото приложение на получените уравнения.

ALLOCATION OF THE CURRENTS WITH ZERO SEQUENCE ALONG THE CABLE LINE IN SINGLE-PHASE GROUND FAULTS

Stefan Stefanov, Ivan Prodanov

¹ University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

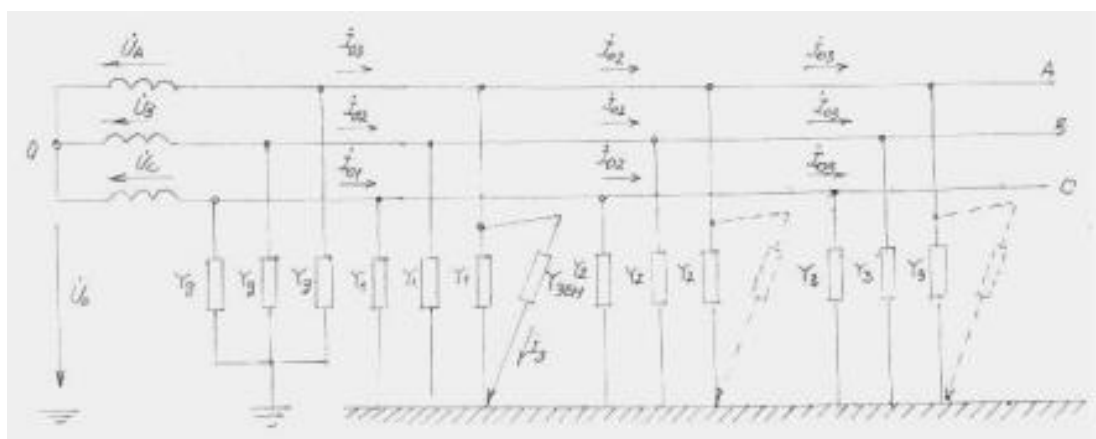
ABSTRACT. Measurement of currents with zero sequence of particular segments and their comparison is one of the effective methodologies for determining the section of the cable line where a ground fault has taken place. This report examines analytical equations through which a quantitative measurement of currents with zero sequence can be carried out. Recommendations with practical application of the resulting equations are proposed.

Един от ефективните методи за определяне на участъка от кабелна линия, в който е станало земно съединение е измерване на токовете с нулева последователност на отделни участъци и тяхното сравнение.

В доклада се дават аналитични уравнения, посредством които количествено могат да се определят токовете с

нулева последователност на отделни участъци от кабелна линия при еднофазно земно съединение на произволен n -ти участък, а също и препоръки за практическото използване на получените уравнения.

На фиг. 1 е показана изчислителна схема на кабелна линия условно разделена на три участъка.



Фиг. 1.

Приети са следните означения:

$\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ - фазовите напрежения на захранващия трансформатор;

\dot{U}_O - напрежението на сместване на нулалата;

Y_1, Y_2, Y_3 - комплексните проводимости на отделните участъци от линията по отношение на земя;

Y_g - проводимостта на изкуствена нулева точка на мрежата;

\dot{I}_{O1} - токът с нулева последователност на първия участък, на който е станала повреда на изолацията;

$\dot{I}_{O2}, \dot{I}_{O3}$ - токовете с нулева последователност на неповредените участъци;

\dot{I}_3 - токът на еднофазното земно съединение.

А. Земно съединение на първия участък

Записваме фазовите симетрични напрежения с права последователност на захранващия трансформатор в комплексна форма:

$$\dot{U}_A = U_\Phi, \quad \dot{U}_B = a^2 \cdot U_\Phi, \quad \dot{U}_C = a \cdot U_\Phi,$$

където $a = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$ е фазовият множител.

На основание на метода на симетричните съставки, токът с нулева последователност за първия участък е равен:

$$\dot{I}_{O1} = \frac{1}{3} \cdot \left(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C \right), \quad (1)$$

където:

$$\dot{I}_A = \left(\dot{U}_A - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_{3EM}), \quad (2)$$

$$\dot{I}_B = \left(\dot{U}_B - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_3), \quad (3)$$

$$\dot{I}_C = \left(\dot{U}_C - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_3).$$

След заместване в (1) получаваме:

$$\dot{I}_{O1} = \frac{1}{3} \cdot \left[\begin{aligned} & \left(\dot{U}_A - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_{3EM}) + \\ & \left(\dot{U}_B - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_3) + \\ & \left(\dot{U}_C - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_3) \end{aligned} \right]. \quad (4)$$

Напрежението на сместване на неутралата определяме по формулата:

$$\begin{aligned} \dot{U}_O &= \frac{Y_A \cdot \dot{U}_A + Y_B \cdot \dot{U}_B + Y_C \cdot \dot{U}_C}{Y_A + Y_B + Y_C} = \\ & U_\Phi \cdot \frac{(A + Y_{3EM} + Y_g) + a^2 \cdot (A + Y_g) + a \cdot (A + Y_g)}{A + Y_{3EM} + Y_g + A + Y_g + A + Y_g} \\ &= U_\Phi \cdot \frac{B + C + D + E + Y_{3EM}}{3 \cdot A + Y_{3EM} + 3 \cdot Y_g} \\ &= U_\Phi \cdot \frac{Y_{3EM}}{3 \cdot A + Y_{3EM} + 3 \cdot Y_g} \\ &= U_\Phi \cdot \frac{Y_{3EM}}{Y_\Sigma + Y_{3EM} + 3 \cdot Y_g}, \end{aligned} \quad (5)$$

където:

$$A = Y_1 + Y_2 + Y_3,$$

$$B = Y_1 + a^2 \cdot Y_1 + a \cdot Y_1,$$

$$C = Y_2 + a^2 \cdot Y_2 + a \cdot Y_2,$$

$$D = Y_3 + a^2 \cdot Y_3 + a \cdot Y_3,$$

$$E = Y_g + a^2 \cdot Y_g + a \cdot Y_g,$$

а $Y_\Sigma = 3 \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_3)$ е сумарната проводимост на разглежданата мрежа.

След заместване на (5) в (4) и съответни преобразувания, получаваме тока с нулева последователност за първия участък:

$$\dot{I}_{O1} = U_\Phi \cdot \frac{Y_{3EM} \cdot Y_g}{Y_\Sigma + Y_{3EM} + 3 \cdot Y_g} \quad (6)$$

При директно земно съединение, когато $Y_{3EM} = \infty$,

токът \dot{I}_{O1} е равен:

$$\dot{I}_{O1} = U_\Phi \cdot Y_g \quad (7)$$

Изразът за тока с нулева последователност на втория участък има вида:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{O2} &= \frac{1}{3} \cdot \left(\dot{I}_A'' + \dot{I}_B'' + \dot{I}_C'' \right) = \frac{1}{3} \cdot \left[\left(\dot{U}_\Phi - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_2 + Y_3) + \right. \\ & \left. + \left(a^2 \cdot \dot{U}_\Phi - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_2 + Y_3) + \left(a \cdot \dot{U}_\Phi - \dot{U}_O \right) \cdot (Y_2 + Y_3) \right] = \\ &= \frac{1}{3} \cdot \left[\left(\dot{U}_\Phi + a^2 \cdot \dot{U}_\Phi + a \cdot \dot{U}_\Phi - 3 \cdot \dot{U}_O \right) \cdot (Y_2 + Y_3) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

След заместване на (5) в (8) се получава:

$$\dot{I}_{O2} = -U_\Phi \cdot Y_{3EM} \cdot \frac{Y_2 + Y_3}{Y_\Sigma + Y_{3EM} + 3 \cdot Y_g}. \quad (9)$$

При директно земно съединение $Y_{3EM} = \infty$, а токът:

$$\dot{I}_{O2} = -U_\Phi \cdot (Y_2 + Y_3) \quad (10)$$

Изразът за тока с нулева последователност на третия участък има вида:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{O3} &= \frac{1}{3} \cdot \left(\dot{I}_A''' + \dot{I}_B''' + \dot{I}_C''' \right) = \\ &= \frac{1}{3} \cdot \left[\left(\dot{U}_\Phi + a^2 \cdot \dot{U}_\Phi + a \cdot \dot{U}_\Phi - 3 \cdot \dot{U}_O \right) \cdot Y_3 \right] = \\ &= \frac{1}{3} \cdot \left[\dot{U}_\Phi \cdot (1 + a^2 + a) - 3 \cdot \dot{U}_O \right] \cdot Y_3 = -\dot{U}_O \cdot Y_3. \end{aligned} \quad (11)$$

След заместване на (5) в (11), за тока I_{O3} се получава:

$$I_{O3} = -U_{\Phi} \cdot Y_3 \cdot \frac{Y_{3EM}}{Y_{\Sigma} + Y_{3EM} + 3 \cdot Y_g} \quad (12)$$

При директно земно съединение, когато $Y_{3EM} = \infty$, за токът I_{O3} се получава:

$$I_{O3} = -U_{\Phi} \cdot Y_3 \quad (13)$$

Б. Земно съединение на втория участък (показано с пунктир на фиг. 1).

Токът с нулева последователност на първия участък при земно съединение на втория участък не се изменя по отношение на предходния случай и следователно може да бъде определен с изрази (6) и (7).

Токът на втория участък определяме с израза:

$$I_{O2} = \frac{1}{3} \cdot \left[\left(U_{\Phi} - U_O \right) \cdot (Y_2 + Y_3 + Y_{3EM}) + \left(a^2 U_{\Phi} - U_O \right) \cdot (Y_2 + Y_3) + \left(a U_{\Phi} - U_O \right) \cdot (Y_2 + Y_3) \right] =$$

$$= U_{\Phi} \cdot Y_{3EM} \cdot \frac{Y_1 + Y_2}{Y_{\Sigma} + Y_{3EM} + 3 \cdot Y_g} \quad (14)$$

При $Y_{3EM} = \infty$,

$$I_{O2} = -U_{\Phi} \cdot (Y_1 + Y_2) \quad (15)$$

Токът с нулева последователност на третия участък при земно съединение на втория участък с отчитане на (5) е:

$$I_{O3} = \frac{1}{3} \cdot \left[\left(U_{\Phi} + a^2 U_{\Phi} + a U_{\Phi} - 3 \cdot U_O \right) \cdot Y_3 \right] =$$

$$= -U_{\Phi} \cdot Y_{3EM} \cdot \frac{Y_3}{Y_{\Sigma} + Y_{3EM} + 3 \cdot Y_g} \quad (16)$$

При $Y_{3EM} = \infty$,

$$I_{O3} = -U_{\Phi} \cdot Y_3 \quad (17)$$

В. Земно съединение на третия участък (на фиг. 1 е показано с пунктир).

Както и преди, токът с нулева последователност на първия участък не се изменя и се определя посредством уравнения (5) и (6).

Аналогично токът с нулева последователност на втория участък се изчислява посредством уравнения (14) и (15).

Токът с нулева последователност на третия участък, на който става земно съединение, с отчитане на (5) е равен на:

$$I_{O3} = \frac{1}{3} \cdot \left[\left(U_{\Phi} - U_O \right) \cdot (Y_3 + Y_{3EM}) + \left(a^2 U_{\Phi} + a U_{\Phi} - 2 \cdot U_O \right) \cdot Y_3 \right] =$$

$$= U_{\Phi} \cdot Y_{3EM} \cdot \frac{Y_1 + Y_2 + Y_g}{Y_{\Sigma} + Y_{3EM} + 3 \cdot Y_g} \quad (18)$$

При директно земно съединение $Y_{3EM} = \infty$. Тогава:

$$I_{O3} = U_{\Phi} \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_g) \quad (19)$$

По аналогичен начин могат да се получат изрази за токовете с нулева последователност в кабелната мрежа с произволен брой участъци при земно съединение, на който да е от тях.

В качеството на пример в табл. 1 са дадени уравненията на токовете с нулева последователност при директно земно съединение на кабелна линия с три участъка.

Таблица 1.
Директно земно съединение в участъците

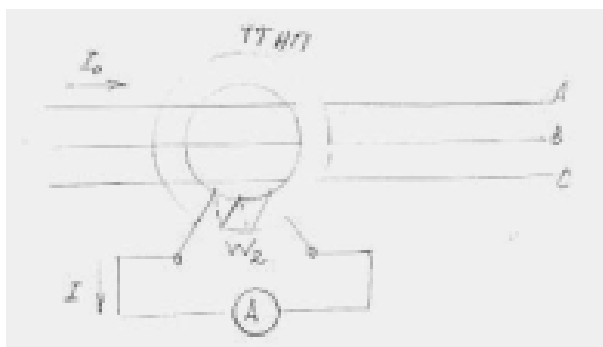
участък	уравнения на токовете при директно земно съединение		
	I_{O1}	I_{O2}	I_{O3}
I	$U_{\Phi} \cdot Y_g$	$-U_{\Phi} \cdot (Y_2 + Y_3)$	$-U_{\Phi} \cdot Y_3$
II	$U_{\Phi} \cdot Y_g$	$U_{\Phi} \cdot (Y_1 + Y_g)$	$-U_{\Phi} \cdot Y_3$
III	$U_{\Phi} \cdot Y_g$	$-U_{\Phi} \cdot Y_3$	$U_{\Phi} \cdot (Y_1 + Y_2 + Y_g)$

Както се вижда от табл. 1, във всички случаи токът с нулева последователност на първия участък от кабелната линия е един и същ и се определя от допълнителната проводимост Y_g . Установява се също, че ако броят на участъците n е по-голям от три, то изразът за тока с нулева последователност на участъка, където е станало земното съединение може да се запише така:

$$I_{On} = U_{\Phi} \cdot (Y_g + Y_1 + Y_2 + \dots + Y_{n-1}) \quad (20)$$

От уравнение (20) следва, че с отдалечаване от началото на линията към нейния край, токът с нулева последователност при повредения участък се увеличава спрямо токовете с нулева последователност на другите участъци, винаги е положителен и най-голям по стойност сред положителните токове. Това свойство дава съответната информация при определянето на участъка с повредената изолация.

На практика токовете с нулева последователност могат да бъдат измерени с помоща на токов трансформатор за нулева последователност (фиг. 2).



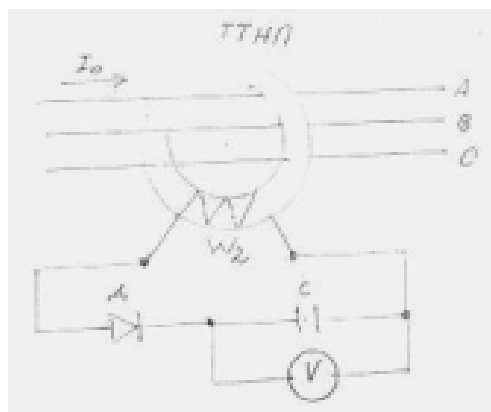
Фиг. 2.

Токът, протичащ през амперметъра е пропорционален на утроения ток с нулева последователност:

$$I = 3 \cdot \frac{W_1}{W_2} \cdot I_0,$$

където W_1 и W_2 са броя на навивките на първичната и вторичната намотки на трансформатора.

В случая, когато кабелната линия се изключва от защитата за земно съединение, за запазване на информацията за токовете с нулева последователност е необходимо да се измери не токът във вторичната верига на трансформатора, а напрежението, по схемата на фиг. 3.



Фиг. 3.

При това волтметърът трябва да има достатъчно голямо вътрешно съпротивление, за да остане кондензаторът зареден продължително време, необходимо за записване на показанията на волтметъра на всички участъци от кабелната линия.

Литература

- Цапенко, Е. Ф. 1986. Замыкание на землю в сетях 6-35 кV. М., Энергоатомиздат.
- Бессонов, Л. А. 1964. Теоретические основы электротехники. М., Высшая школа.
- Сирота, И. М. 1983. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. Киев, Наукова думка.